نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی DOI: 10.22067/civil.v29i1.43560 سال بیست و نهم، شمارهٔ یک، ۱۳۹٦

تحلیل عددی استاتیکی عملکرد زه‌کش چتری در تونل بدون پوشش دایروی عمیق تحت تراوش پایدار★

علی حسین‌بالام [۱] محمود هاشمی [۲]

چکیده *در این تحقیق سیستم زه‌کش چتری، به‌عنوان یک سیستم زه‌کشی در تونل‌های تحت اثر تراوش پایدار معرفی می‌گردد. آرایش این سیستم زه‌کشی برگرفته از ترکیب زه‌کش لولهٔ اتصالی و الهام گرفته‌شده از نگهدارندهٔ چتری فورپولینگ است. در این پژوهش به‌وسیلهٔ نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، عملکرد این سیستم زه‌کشی به‌صورت تحلیل استاتیکی عددی در تونل دایروی عمیق تحت تراوش پایدار، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله با درنظر گرفتن سه پارامتر شاهد (کرنش اصلی مؤثر ماکزیمم در زمین تونل، توزیع فشار آب حفره‌ای در جدارهٔ تونل و گرادیان هیدرولیکی در اطراف زه‌کش‌ها) و بررسی کلیهٔ مشخصات مؤثر بر عملکرد لولهٔ زه‌کش، به ارائهٔ یک آرایش بهینه برای این سیستم زه‌کشی پرداخته شده است.*

واژه‌های کلیدی زه‌کش چتری، تونل دایروی عمیق، تراوش پایدار و تحلیل عددی استاتیکی.

Numerical Statical Analysis of Umbrella Drain Performance in Deep Circular Not-lined Tunnel for Steady-State Seepage

A. Hosseinbalam M. Hashemi

Abstract *In this article, Umbrella drainage system is presented as a alternative drainage system for the tunnels under steady state-seepage condition. The arrangement of this system is inspired from pin-hole drainage system and forepoling method of support installation. In this study, the performance of this drainage system is investigated through numerical statical analysis for deep circular tunnels subjected to steady-state seepage by using ABAQUS finite element software. In this regard, three monitoring parameters have been investigated: tunnel domain's maximum effective principle strain, pore water pressure distribution of the tunnel walls and hydraulic gradient around the drainages. By taking into account these parameters, an optimum arrangement for the draining system is presented through exploring all of the factors affecting the drainage tube performance.*

Key Words Umbrella Drainage, Deep Circular Tunnel, Steady-State Seepage and Numerical Statical Analysis.

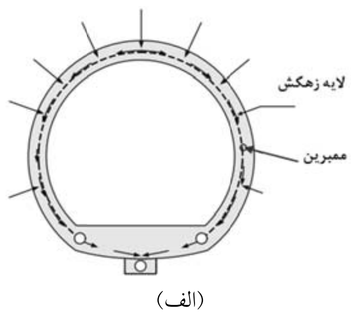
★ تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۱۰/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۵/۱۸ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد مهندسی خاک و پی، گروه عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

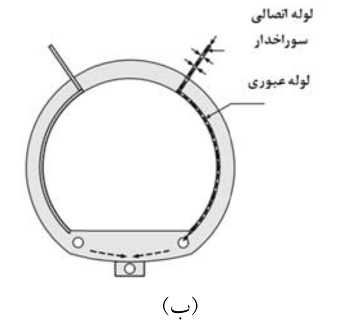
(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان. Email: M.hashemi@eng.ui.ac.ir

مقدمه

از جمله مسائل مطرح در تونل‌ها، بحث تراوش می‌باشد. این مسئله از آن‌جایی که فشار آب حفره‌ای یک نیروی اضافی را به جدارهٔ تونل وارد می‌کند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا فشار آب حفره‌ای باعث زوال سازه‌ای جدارهٔ تونل می‌شود. لذا نیاز به زه‌کشی در این تونل‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. سیستم‌های زه‌کشی مطرح در تونل‌ها انواع مختلفی را شامل می‌شود. از انواع معمول آنها می‌توان به سیستم زه‌کش فیلتر محیطی و سیستم زه‌کش لوله اتصالی اشاره کرد. با این حال تاکنون مطالعات نسبتاً محدودی برروی این سیستم‌های زه‌کشی و عوامل مؤثر در آنها، به‌خصوص برای سیستم زه‌کش لوله اتصالی، انجام گردیده است. در شکل (۱) این دو نوع سیستم زه‌کشی نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

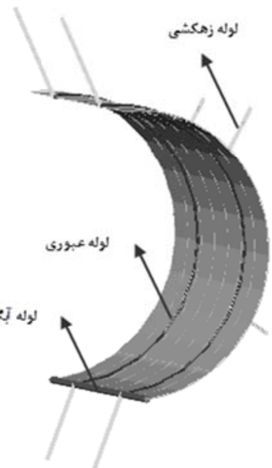
شکل ۱ سیستم‌های زه‌کشی معمول در تونل‌های تحت تراوش (الف) سیستم زه‌کش فیلتر محیطی (ب) سیستم زه‌کش لولهٔ اتصالی [1]

سیستم زه‌کش فیلتر محیطی در چند مورد قابل استفاده یا مقرون به‌صرفه نمی‌باشد. نخست تونل‌های با قطر زیاد به‌علت حجم بالای مصالح مورد نیاز برای زه‌کشی کلی جدارهٔ تونل از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. دیگر، تونل‌های با سطح مقطع غیردایروی به‌علت ملاحظات اجرایی دشوار برای زه‌کشی کامل جدارهٔ تونل مقرون به صرفه نیستند. از دیگر موارد، تونل‌های تک‌لایه‌ای هستند که به دلیل لزوم اجرای این نوع سیستم زه‌کش در بین پوشش موقتی و دائمی، به منزلهٔ نگهداری کامل این سیستم زه‌کش پیرامون دیوارهٔ تونل، عمر مفید زه‌کش فیلتر محیطی در هنگام کاربرد در تونل‌های تک لایه‌ای کاهش می‌یابد [1].

سیستم زه‌کشی مطرح‌شده در این تحقیق، سیستم زه‌کش چتری می‌باشد. آرایش این نوع سیستم زه‌کش از ترکیب زه‌کش لوله اتصالی و نگهدارندهٔ چتری فورپولینگ اقتباس شده است. فورپولینگ (پیش‌لوله‌گذاری) یک روش پیش‌تحکیمی برای سازندهای ضعیف است. سیستم زه‌کش چتری شامل نصب لوله‌های زه‌کش در جبههٔ تونل است. در این نوع سیستم زه‌کش، زه‌کشی فقط از طریق لوله‌ها صورت می‌پذیرد. آب زه‌کشی‌شده از طریق لوله‌های عبوری به لولهٔ آبگیری به‌منظور تخلیه از تونل انتقال داده می‌شود. لازم به ذکر است که این سیستم زه‌کشی هیچ کدام از محدودیت‌های ذکرشده برای سیستم زه‌کش فیلتر محیطی را ندارد. در شکل (۲) نمونه‌ای از سیستم زه‌کش چتری به‌همراه اجزای اصلی آن به‌صورت شماتیک نشان داده شده است.

در مورد پژوهش‌های انجام گرفته در مورد تونل‌های تحت تراوش می‌توان به مطالعات یونگ و همکاران [2]، نام و بوبت [3]، فهیمی‌فر و زارعی‌فرد [4]، لی و همکاران [5]، شین و همکاران [6]، لی و نام [7]، لی و وانگ [8]، کالری [9]، شین و همکاران [10]، آجنوی و همکاران [11]، زیانگ و همکاران [12]، بوبت [13]، شین و همکاران [14]، لی و همکاران [15]، لی و نام [16]، کلیمباس و واگنر [17]، بوتر [18]، پارک و همکاران [19] و فرناندز و مون [20]

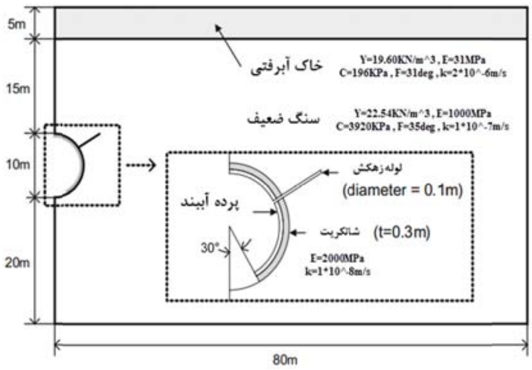
اشاره کرد.



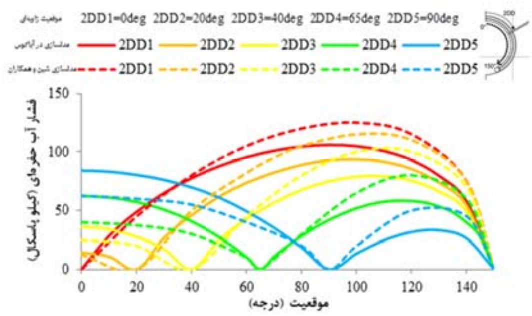
شکل ۲ سیستم زه‌کش چتری

صحت‌سنجی در نرم‌افزار

گام اول در هر پژوهش عددی، صحت‌سنجی نرم‌افزار مورد استفاده به‌منظور اعتبارسنجی کد استفاده‌شده در نرم‌افزار و قابلیت مدل‌سازی کاربر استفاده‌کننده از نرم-افزار می‌باشد. لذا در این تحقیق به‌منظور صحت‌سنجی، از پژوهشی که شین و همکاران [1] در سال ۲۰۰۹ بر روی زه‌کش لوله اتصالی برای بررسی اثر موقعیت زاویهٔ محیطی لولهٔ زه‌کش انجام داده‌اند بهره گرفته شده است. آنها به بررسی کنترل فشار آب حفره‌ای و رفتار هیدرولیکی در پوشش تونل زیر سطح آب زیرزمینی بااستفاده از سیستم زه‌کش لوله اتصالی به‌صورت عددی بااستفاده از برنامهٔ اجزای محدود MIDAS-GTS پرداختند. در این مطالعه، پارامترهای مختلفی از سیستم زه‌کش لوله اتصالی مانند تعداد (تک و جفت) در مقطع جانبی تونل، طول، زاویهٔ محیطی از تاج تونل، زوایای تمایل طولی و جانبی از سطح تونل و فواصل طولی در امتداد تونل بررسی شد. آنها مطابق شکل (۳- الف) برای مدل دوبعدی خود ابعاد و مشخصات مصالح را برای مدل رفتاری الاستوپلاستیک متخلخل اشباع خود درنظر گرفتند. هم‌چنین آنها با درنظر گرفتن شرط مرزی هد کل صفر برای مرزهای بالا، پایین و سمت راست مدل، اقدام کردند به تحلیل هم‌زمان مکانیکی– هیدرولیکی تحت تراوش پایدار مدل. در شکل (۳- ب) اثر موقعیت زاویهٔ محیطی زه‌کش لوله اتصالی حاصل از نتایج شین و همکاران و مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است. براساس این شکل می‌توان اذعان داشت که صحت‌سنجی در نرم‌افزار به‌طور مطلوبی صورت پذیرفته است.



(الف)



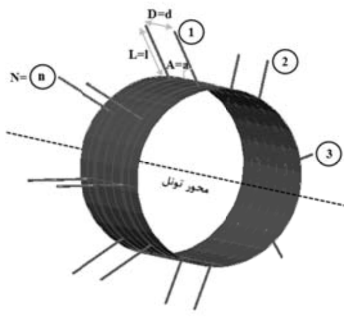
(ب)

شکل ۳ (الف) مدل شین و همکاران [1]، (ب) اثر موقعیت زاویهٔ محیطی زه‌کش لولهٔ اتصالی حاصل از نتایج شین و همکاران [1] و مدل‌سازی در نرم‌افزار

مدل‌سازی در نرم‌افزار

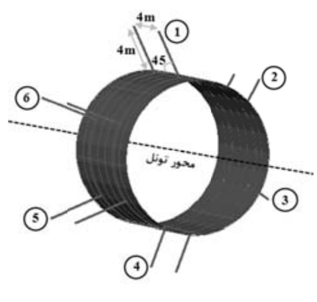
پارامترهای مؤثر بر لوله‌های زه‌کش این سیستم زه‌کشی شامل تعداد، طول، فاصله و زاویه می‌باشند. لذا به‌منظور معرفی یک آرایش خاص از لوله‌های زه‌کش در این

سیستم زه‌کشی، در ادامهٔ این تحقیق از یک نام‌گذاری نمادین استفاده شده است. روش نام‌گذاری نمادین به این صورت است که اگر تعداد لوله‌های زه‌کش در مقطع دایروی تونل برابر n، طول لوله‌ها برابر l متر، فاصلهٔ بین لوله‌ها در طول تونل برابر d متر و زاویهٔ بین لوله‌ها و محور طولی تونل برابر a درجه باشد، نام‌گذاری نمادین این آرایش از لوله‌ها به‌صورت NnLlDdAa می‌باشد. در شکل (٤) نحوهٔ نام‌گذاری نمادین آرایش لوله‌های زه‌کش، در سیستم زه‌کش چتری ارائه شده است.



شکل ٤ مدل NnLlDdAa

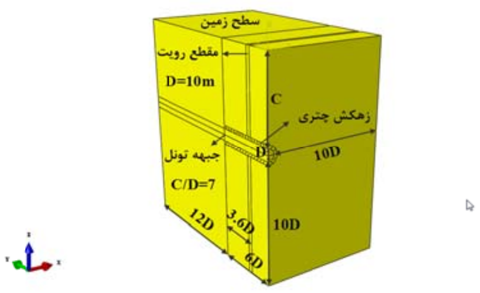
هم‌چنین باتوجه به پژوهش شین و همکاران [1]، یک مدل پایه برای سیستم زه‌کش چتری به‌منظور یک مدل اولیهٔ منطقی برای این سیستم زه‌کشی درنظر گرفته شده است. مدل پایه دارای شش عدد لولهٔ زه‌کش، به طول ٤ متر، فاصلهٔ ٤ متر و زاویهٔ ٤٥ درجه می‌باشد. در شکل (٥) این مدل پایه، برای سیستم زه‌کش چتری نشان داده شده است.



شکل ٥ مدل پایه

در این پژوهش [٢١] بااستفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس [22] با انجام تحلیل سه‌بعدی استاتیکی به ارائهٔ یک آرایش بهینه برای لوله‌های زه‌کش سیستم زه‌کش چتری، در تونل بدون پوشش دایروی عمیق تحت تراوش پایدار پرداخته شده است.

یکی از مسائل بسیار مهم در مطالعات عددی ژئوتکنیکی، درنظر گرفتن ابعاد صحیح برای مدل در نرم‌افزار می‌باشد. اگر ابعاد این مدل کوچک باشد، باعث ایجاد خطا در مدل‌سازی می‌گردد و درصورتی که بزرگ باشد، از لحاظ زمان تحلیل و حجم اطلاعات خروجی مقرون به‌صرفه نمی‌باشد. با انجام تحلیل هم‌گرایی، مدلی به ابعاد نشان داده شده در شکل (٦) برحسب قطر تونل (D) و روبارهٔ تونل (C) درنظر گرفته شده است.

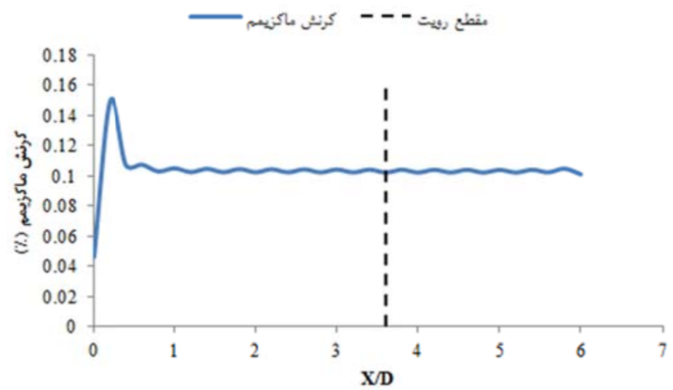


شکل ٦ ابعاد مدل

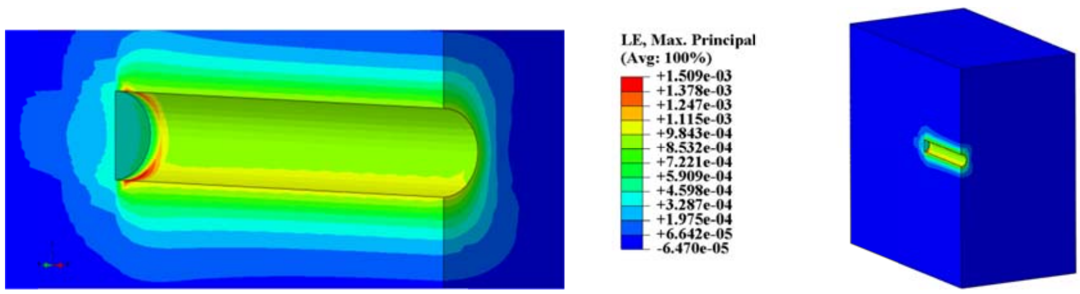
همان‌گونه که در شکل (٦) نشان داده شده است، مقطعی به فاصلهٔ 3.6D از جبههٔ تونل در فاصلهٔ بین دو زه‌کش متوالی به‌عنوان مقطع رؤیت درنظر گرفته شده است. در این تحقیق از این مقطع، برای قرائت خروجی‌های پایدارشدهٔ مورد نیاز در مدل سه‌بعدی بهره گرفته شده است. در شکل (٧) کرنش ماکزیمم در کف تونل برای مدل پایه، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که X/D بیانگر فاصلهٔ بی‌بعدشده از جبههٔ تونل نسبت به قطر تونل می‌باشد. باتوجه به شکل (٧) نتیجه می‌شود که کرنش ماکزیمم در کف تونل، با فاصله گرفتن از زه‌کش‌های جبههٔ تونل کاهش می‌یابد.

همچنین کرنش ماکزیمم در کف تونل، در مقطع رؤیت به مقدار پایدار خود میل کرده است. همچنین در شکل (۸) کانتور کرنش ماکزیمم برای مدل پایه نشان داده شده است.

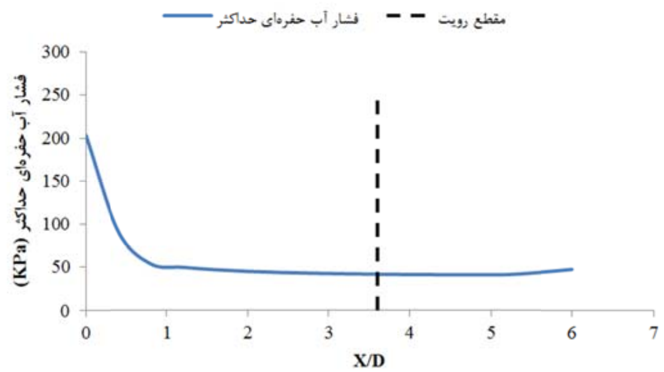
در شکل (۹) فشار آب حفره‌ای در جدارهٔ تونل در فاصلهٔ بین دو زه‌کش بالایی تونل برای مدل پایه، نشان داده شده است. باتوجه به شکل (۹) نتیجه می‌شود که فشار آب حفره‌ای در جدارهٔ تونل با فاصله گرفتن از زه‌کش‌های جبههٔ تونل کاهش می‌یابد. همچنین فشار آب حفره‌ای در جدارهٔ تونل در مقطع رؤیت به مقدار پایدار خود میل کرده است. همچنین در شکل (۱۰) کانتور فشار آب حفره‌ای برای مدل پایه نشان داده شده است.



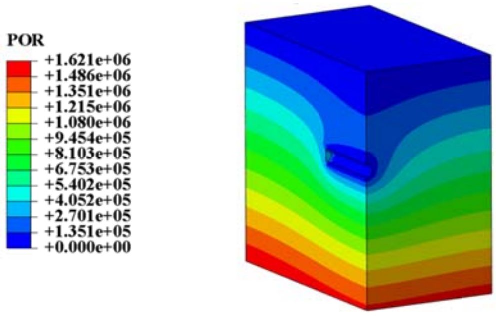
شکل ۷ کرنش ماکزیمم



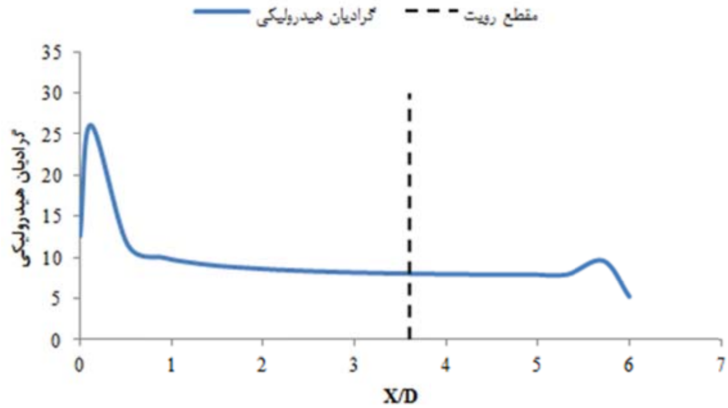
شکل ۸ کانتور کرنش ماکزیمم برای مدل پایه



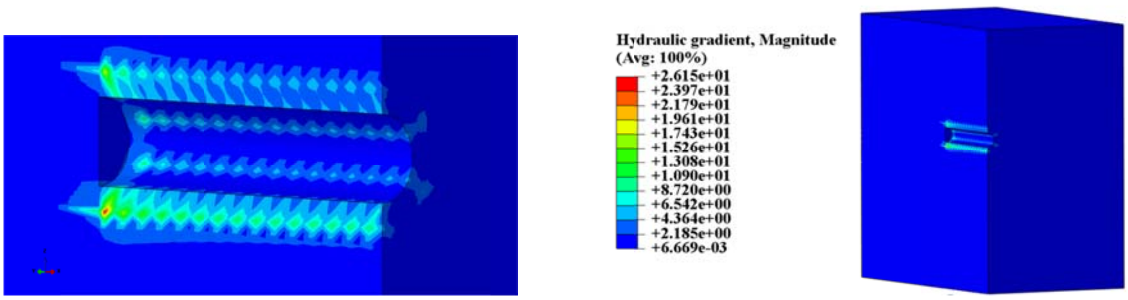
شکل ۹ فشار آب حفره‌ای حداکثر



شکل ۱۰ کانتور فشار آب حفره‌ای برای مدل پایه (Pa)



شکل ۱۱ گرادیان هیدرولیکی



شکل ۱۲ کانتور گرادیان هیدرولیکی برای مدل پایه

در شکل (۱۱) گرادیان هیدرولیکی در سر زه‌کش‌های پایینی تونل برای مدل پایه، نشان داده شده است. باتوجه به شکل (۱۱) نتیجه می‌شود که گرادیان هیدرولیکی در سر زه‌کش‌های پایینی تونل با فاصله گرفتن از زه‌کش‌های جبههٔ تونل کاهش می‌یابد. هم‌چنین گرادیان هیدرولیکی در سر زه‌کش‌های پایینی تونل در مقطع رؤیت به مقدار پایدار خود میل کرده است. هم‌چنین در شکل (۱۲) کانتور گرادیان هیدرولیکی برای مدل پایه نشان داده شده است.

ویژگی‌های مصالح در این تحقیق برگرفته از

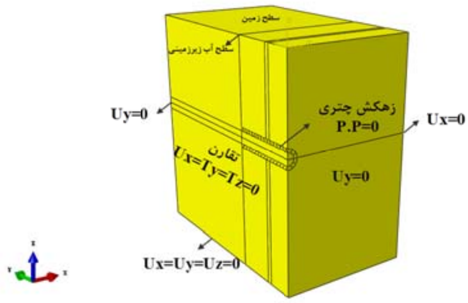
پـژوهش شـین و همکـاران [1] اسـت. در جـدول (۱) مشخصات مصالح در مدل‌سازی در نرم‌افزار ارائه شـده است.

گام بعـدی در مـدل‌سـازی عـددی در نـرم‌افـزار، انتخـاب روش تحلیـل بـرای حـل مـدل اسـت. روش تحلیلی درنظر گرفته‌شده، تحلیل هم‌زمان هیـدرولیکی- مکانیکی تراوش پایدار می‌باشد. ایـن روش تحلیلـی بـا درنظر گـرفتن اثـرات تـوأم هیـدرولیکی و مکـانیکی از جامعیت ویژه‌ای برخوردار است.

جدول ۱ مشخصات مصالح در مدل‌سازی

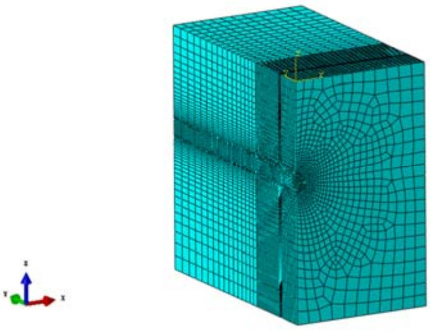
$E = 1000\mathrm{MPa}$	$\nu = 0.25$
$\gamma_d = 20\ \mathrm{KN/m^3}$	$\gamma_{sat} = 23\ \mathrm{KN/m^3}$
$k = 10^{-7}\ \mathrm{m/s}$	

مرحلهٔ بعـد در مـدل‌سـازی عـددی در نـرم‌افـزار، اعمال شرایط مرزی است. در شکل (۱۳) شرایط مـرزی مکانیکی و هیدرولیکی در مدل‌سازی ارائه شده است.



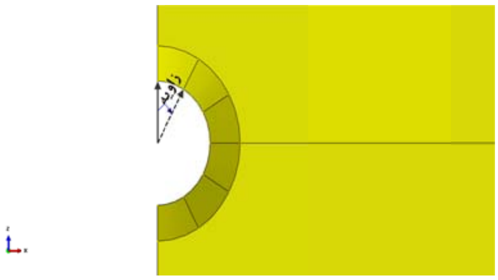
شکل ۱۳ شرایط مرزی در مدل‌سازی

سپس شتاب گرانش به‌عنوان تنها نیـروی خـارجی مؤثر بر مدل، در مدل‌سازی اعمال می‌گردد. با انجام این فرآیند، بارگذاری در مدل‌سازی نیز به اتمـام مـی‌رسـد. گام بعدی در مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار، مـش‌بنـدی مدل است. المان درنظر گرفتـه شـده بـرای مـش‌بنـدی، المان مکعبی هشت‌گره‌ای خطی (استاندارد درجـهٔ اول) مـی‌باشـد. در شـکل (۱٤) مـدل مـش‌بنـدی‌شـده در مدل‌سازی ارائه شده است.



شکل ۱٤ مدل مش‌بندی‌شده

برای بررسی پارامترهای مـؤثر در سیسـتم زه‌کـش چتری بر توزیع فشار آب حفره‌ای در جـدارهٔ تونـل، از ترسیم توزیع ایـن متغیـر در محـل زه‌کـش‌هـای مقطـع رؤیت بهره گرفتـه شـده اسـت. در شـکل (۱۵) زاویـهٔ قراردادی برای رسم توزیع فشار آب حفره‌ای در جدارهٔ تونل نشان داده شده است.

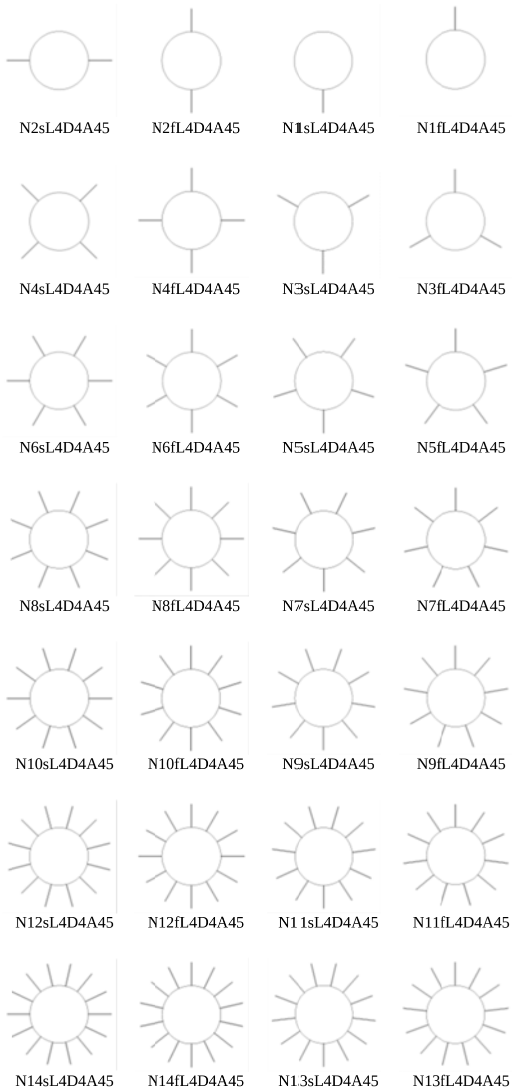


شکل ۱۵ زاویهٔ قراردادی برای رسم توزیع فشار آب حفره‌ای

اثر تعداد لوله‌های زه‌کش

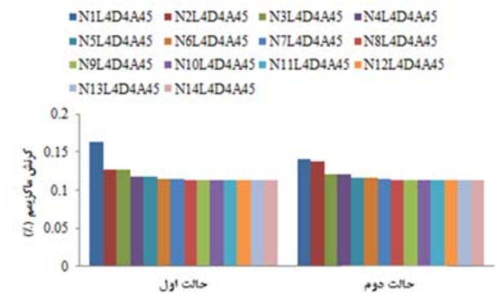
از آن‌جا که در این بخش از بین چهار پـارامتر مـؤثر بـر لوله‌های زه‌کش، فقط بـه بررسـی اثـر تعـداد لولـه‌هـای زه‌کش پرداخته شده است. لذا نیاز به درنظر گرفتن سـه مقدار ثابت، برای سه پارامتر مـؤثر دیگـر بـر لولـه‌هـای زه‌کش می‌باشد. این سه مقدار ثابت همان‌گونه کـه قـبلاً بیان گردید، از مدل پایه گرفته شده است؛ یعنـی طـول، فاصله و زاویهٔ لوله‌های زه‌کش به‌ترتیب ٤ متر، ٤ متـر و ٤۵ درجه درنظر گرفته شـده اسـت. بـرای بررسـی اثـر تعداد لوله‌های زه‌کش بر کرنش ماکزیمم، تعداد ۱ تا ۱٤ عدد لولهٔ زه‌کش در مقطع دایروی تونـل درنظـر گرفتـه

شده است. از آن‌جا که آرایش لوله‌های زه‌کش در این سیستم زه‌کشی، در دو نیمهٔ راست و چپ تونل نسبت به یکدیگر متقارن است؛ لذا برای هر آرایش تعدادی از این لوله‌های زه‌کش در مقطع دایروی تونل، دو حالت را می‌توان درنظر گرفت. در شکل (١٦) این دو حالت از هر آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش، به‌همراه نام‌گذاری آنها نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این نام‌گذاری، حرف f بیانگر حالت اول و حرف s بیانگر حالت دوم می‌باشد.



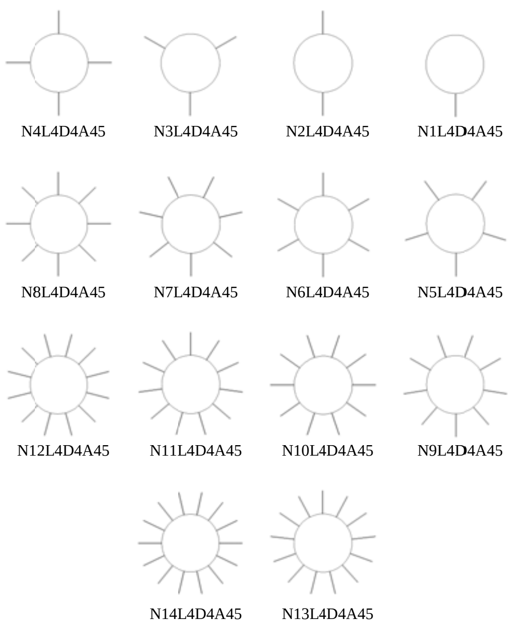
شکل ١٦ آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش در دو حالت به‌همراه تام‌گذاری

در شکل (١٧) مقدار کرنش ماکزیمم، در هر دو حالت از این آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است.



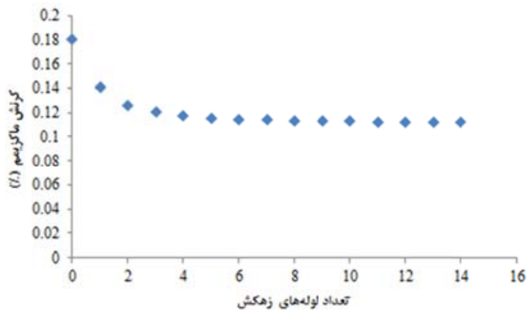
شکل ١٧ تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش در دو حالت بر کرنش ماکزیمم

همان‌گونه که در شکل (١٧) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که از بین دو حالت اول و دوم از هر آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش، فقط یک حالت وجود دارد که به‌صورت بهینه کرنش ماکزیمم کمتری را ایجاد می‌کند. در شکل (١٨) این حالت بهینه از هر آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش، به‌همراه نام‌گذاری آنها نشان داده شده است.



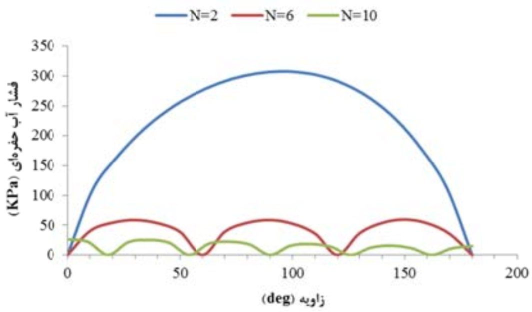
شکل ١٨ آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش در حالت بهینه به‌همراه نام‌گذاری

همان‌گونه که در شکل (۱۸) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که وجه مشترک معمول حالت بهینه آرایش تعدادی لوله‌های زهکش، ضرورت زه‌کشی از کف تونل می‌باشد. این امر به‌صورت مشهود برای تعداد لوله‌های زه‌کش ۱ تا ۹ عدد در مقطع دایروی تونل دیده می‌شود. این امر تأیید کنندهٔ ضرورت کاربرد همان سیستم زه‌کشی معکوس در تونل‌های تحت تراوش است. در شکل (۱۹) مقدار کرنش ماکزیمم، در حالت بهینهٔ آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۹) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که با افزایش تعداد لوله‌های زه‌کش در مقطع دایروی تونل کرنش ماکزیمم کاهش می‌یابد. البته این کاهش کرنش ماکزیمم، تا تعداد ۸ عدد لولهٔ زه‌کش در مقطع دایروی تونل مشهود است. لازم به ذکر است که عدد صفر برای تعداد لوله‌های زه‌کش در مقطع دایروی تونل بیانگر کرنش ماکزیمم بدون درنظر گرفتن سیستم زه‌کشی می‌باشد.



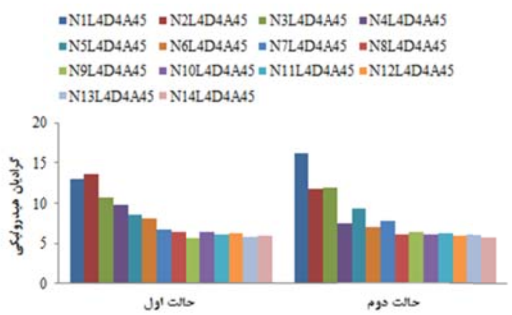
شکل ۱۹ تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش در حالت بهینه بر کرنش ماکزیمم

برای بررسی اثر تعداد لوله‌های زه‌کش بر فشار آب حفره‌ای، فقط تعداد ۳، ٦ و ۱۰ عدد لولهٔ زه‌کش در مقطع دایروی تونل درنظر گرفته شده است. در شکل (۲۰) توزیع فشار آب حفره‌ای، در این حالت از آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۲۰) نشان داده شده است، نتیجه می‌شود که با افزایش تعداد لوله‌های زه‌کش در مقطع دایروی تونل فشار آب حفره‌ای کاهش می‌یابد.



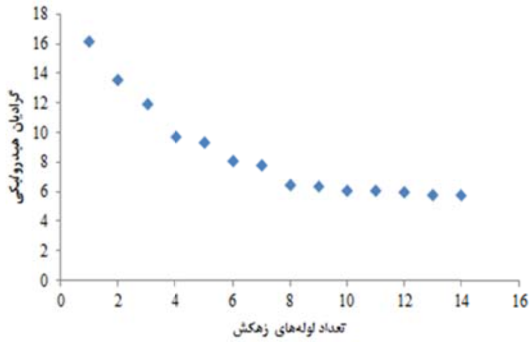
شکل ۲۰ تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش بر توزیع فشار آب حفره‌ای

در شکل (۲۱) مقدار گرادیان هیدرولیکی در هر دو حالت از آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۲۱) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که از بین دو حالت از هر آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش فقط یک حالت وجود دارد که به‌صورت بهینه حداکثر گرادیان هیدرولیکی کمتری را ایجاد می‌کند. البته لازم به ذکر است که این حالت بهینه، الزاماً همان حالت بهینهٔ آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش به‌منظور ایجاد کرنش ماکزیمم کمتر نیست. مثلاً مدل N2L4D4A45 حالت اول، از جمله حالات بهینهٔ آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش به‌منظور کاهش کرنش ماکزیمم است؛ ولی همین مدل، از جمله حالات بهینهٔ آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش به‌منظور کاهش گرادیان هیدرولیکی نیست.



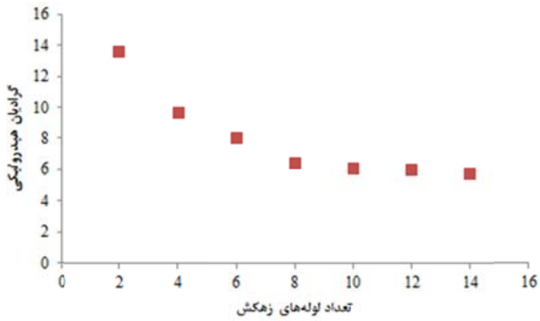
شکل ۲۱ تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش در دو حالت بر گرادیان هیدرولیکی

از آن‌جا که رویکرد اصلی در این تحقیق، بررسی اثر عوامل مؤثر بر لوله‌های زه‌کش برمبنای کرنش ماکزیمم است. لذا از بررسی حالات بهینهٔ آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش به‌منظور کاهش گرادیان هیدرولیکی اجتناب گردیده است. در شکل (۲۲) مقدار گرادیان هیدرولیکی در حالت بهینهٔ آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است.

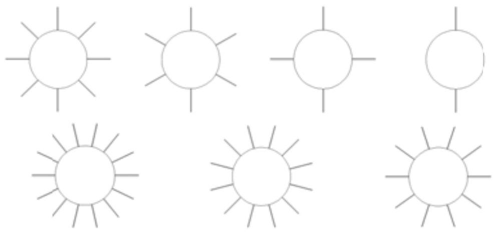


شکل ۲۲ تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش در حالت بهینه بر گرادیان هیدرولیکی

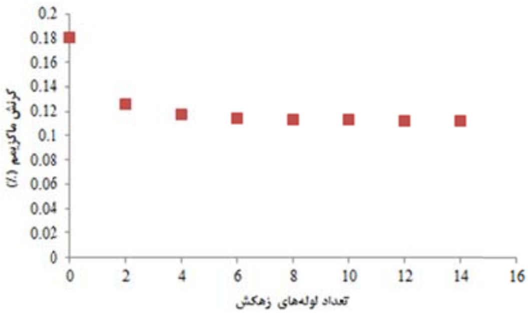
همان‌گونه که در شکل (۲۲) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که با افزایش تعداد لوله‌های زه‌کش در مقطع دایروی تونل، گرادیان هیدرولیکی به‌طور معمول کاهش می‌یابد. هم‌چنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کاهش گرادیان هیدرولیکی برای تعداد ۵، ۷ و ۹ عدد لولهٔ زه‌کش در مقطع دایروی تونل، به‌ترتیب در مقایسه با گرادیان هیدرولیکی برای تعداد ٤، ٦ و ٨ عدد لولهٔ زه‌کش در مقطع دایروی تونل ناچیز است؛ لذا با درنظر گرفتن تعداد زوج برای لوله‌های زه‌کش در مقطع دایروی تونل، می‌توان از کاهش مؤثرتر گرادیان هیدرولیکی بهره برد. در شکل (۲۳) مقدار گرادیان هیدرولیکی در حالت زوج آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است.



شکل ۲۳ تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش در حالت زوج بر گرادیان هیدرولیکی



شکل ٢٤ آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش در حالت زوج



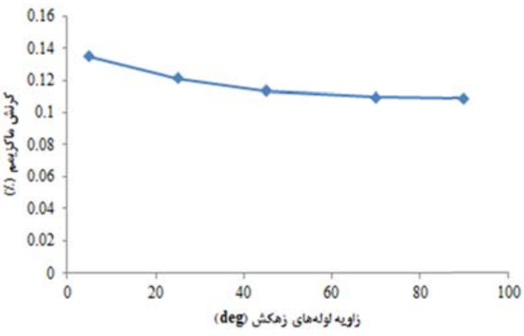
شکل ۲۵ تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش در حالت زوج بر کرنش ماکزیمم

همان‌گونه که در شکل (۲۳) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که این کاهش گرادیان هیدرولیکی تا همان تعداد ۸ عدد لولهٔ زه‌کش در مقطع دایروی تونل قابل ملاحظه است. این امر دلالت بر حاکمیت عوامل هیدرولیکی نسبت به عوامل مکانیکی بر تونل تحت تراوش دارد. در شکل (٢٤) حالات زوج از آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است. هم‌چنین

در شکل (۲۵) مقدار کرنش ماکزیمم، در حالت بهینهٔ آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش برای حالات زوج نشان داده شده است.

اثر زاویهٔ لوله‌های زه‌کش

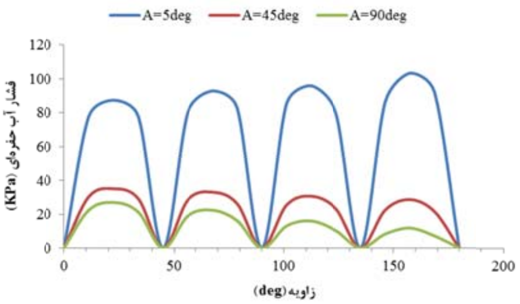
از آن‌جا که در این بخش از بین چهار پارامتر مؤثر بر لوله‌های زه‌کش، فقط به بررسی اثر زاویهٔ لوله‌های زه‌کش پرداخته شده است. لذا نیاز به درنظر گرفتن سه مقدار ثابت برای سه پارامتر مؤثر دیگر بر لوله‌های زه‌کش است. در بخش قبل به این نتیجه رسیده شد که بهترین تعداد برای آرایش مذکور، تعداد ۸ عدد لولهٔ زه‌کش در مقطع دایروی تونل است؛ لذا در این بخش سه مقدار ثابت ۸، ٤ متر و ٤ متر به‌ترتیب برای سه پارامتر تعداد، طول و فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش درنظر گرفته شده است. هم‌چنین برای بررسی اثر زاویهٔ لوله‌های زه‌کش بر کرنش ماکزیمم، زوایای ۵، ۲۵، ٤۵، ۷۰ و ۹۰ درجه برای لوله‌های زه‌کش نسبت به محور طولی تونل درنظر گرفته شده است. در شکل (۲٦) کرنش ماکزیمم، به‌ازای این زوایای لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است.



شکل ۲٦ تأثیر زاویهٔ لوله‌های زه‌کش بر کرنش ماکزیمم

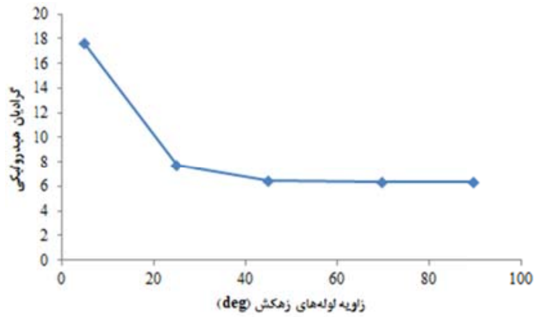
همان‌گونه که در شکل (۲٦) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که با افزایش زاویهٔ لوله‌های زه‌کش نسبت به محور طولی تونل، کرنش ماکزیمم کاهش می‌یابد. هرچند زاویهٔ بهینه برای لوله‌های زه‌کش در آرایش مذکور، زاویهٔ ۹۰ درجه نسبت به محور طولی تونل است، ولی این کاهش کرنش ماکزیمم تا زاویهٔ ٤۵ درجه برای لوله‌های زه‌کش نسبت به محور طولی تونل مشهود است. لذا به‌دلیل ملاحظات اجرایی و تجهیزات کارگاهی، می‌توان لوله‌های زه‌کش را با زاویهٔ بیشتر از ٤۵ درجه نسبت به محور طولی تونل نصب کرد.

برای بررسی اثر زاویهٔ لوله‌های زه‌کش بر فشار آب حفره‌ای، فقط زوایای ۵، ٤۵ و ۹۰ درجه برای لوله‌های زه‌کش، نسبت به محور طولی تونل درنظر گرفته شده است. در شکل (۲۷) توزیع فشار آب حفره‌ای، به‌ازای این زوایای لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است.



شکل ۲۷ تأثیر زاویهٔ لوله‌های زه‌کش بر توزیع فشار آب حفره‌ای

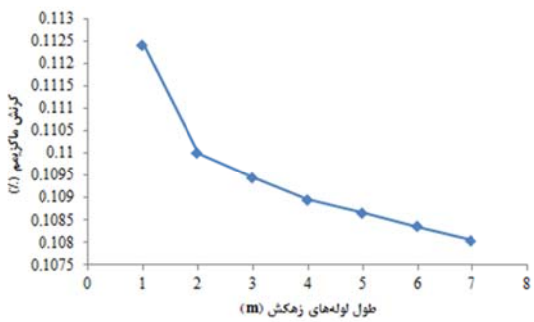
همان‌گونه که در شکل (۲۷) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که با افزایش زاویهٔ لوله‌های زه‌کش نسبت به محور طولی تونل، فشار آب حفره‌ای کاهش می‌یابد. در شکل (۲۸) مقدار گرادیان هیدرولیکی، به‌ازای زوایای لوله‌های زه‌کش نسبت به محور طولی تونل نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۲۸) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که با افزایش زاویهٔ لوله‌های زه‌کش نسبت به محور طولی تونل گرادیان هیدرولیکی کاهش می‌یابد. هم‌چنین این کاهش گرادیان هیدرولیکی تا همان زاویهٔ ٤۵ درجه برای لوله‌های زه‌کش نسبت به محور طولی تونل مشهود است. این امر نیز دلالت بر حاکمیت عوامل هیدرولیکی نسبت به عوامل مکانیکی بر تونل تحت تراوش دارد.



شکل ۲۸ تأثیر زاویهٔ لوله‌های زهکش بر گرادیان هیدرولیکی

اثر طول لوله‌های زه‌کش

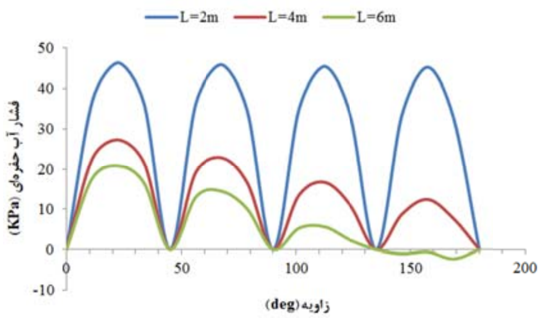
از آن‌جا که در این بخش از بین چهار پارامتر مؤثر بر لوله‌های زه‌کش، فقط به بررسی اثر طول لوله‌های زه‌کش پرداخته شده است، لذا نیاز به درنظر گرفتن سه مقدار ثابت، برای سه پارامتر مؤثر دیگر بر لوله‌های زه‌کش است. در بخش قبل به این نتیجه رسیده شد که زاویهٔ بهینه برای لوله‌های زه‌کش در آرایش مذکور، زاویهٔ ۹۰ درجه نسبت به محور طولی تونل می‌باشد. لذا در این بخش سه مقدار ثابت ۸، ٤ متر و ۹۰ درجه، به‌ترتیب برای سه پارامتر تعداد، فاصله و زاویهٔ لوله‌های زه‌کش درنظر گرفته شده است. هم‌چنین برای بررسی اثر طول لوله‌های زه‌کش بر کرنش ماکزیمم، طول‌های ۱ تا ۷ متر برای لوله‌های زه‌کش درنظر گرفته شده است. در شکل (۲۹) مقدار کرنش ماکزیمم، به‌ازای این طول‌های لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است.



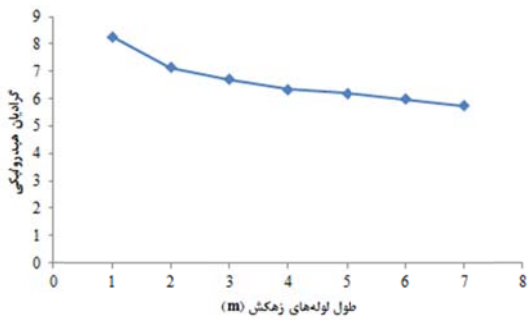
شکل ۲۹ تأثیر طول لوله‌های زه‌کش بر کرنش ماکزیمم

همان‌گونه که در شکل (۲۹) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که با افزایش طول لوله‌های زه‌کش، کرنش ماکزیمم کاهش می‌یابد. هم‌چنین این کاهش کرنش ماکزیمم تا طول ٤ متر، برای لوله‌های زه‌کش مشهود است. لذا به‌دلیل ملاحظات اجرایی و تجهیزات کارگاهی به‌خصوص طول بازوی جامبو دریل در حفاری مکانیزهٔ لوله‌های زه‌کش، می‌توان طول بهینه برای لوله‌های زه‌کش را همان طول ٤ متر دانست.

برای بررسی اثر طول لوله‌های زه‌کش بر فشار آب حفره‌ای فقط طول‌های ۲، ٤ و ٦ متر برای لوله‌های زه‌کش درنظر گرفته شده است. در شکل (۳۰) توزیع فشار آب حفره‌ای، به‌ازای این طول‌های لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۳۰) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که با افزایش طول لوله‌های زه‌کش، فشار آب حفره‌ای کاهش می‌یابد. به‌گونه‌ای که کاربرد طول ٦ متر برای لوله‌های زه‌کش، باعث ایجاد مکش در کف تونل می‌گردد. این امر دلالت بر غیر توجیه‌پذیر بودن کاربرد این طول برای لوله‌های زه‌کش دارد.



شکل ۳۰ تأثیر طول لوله‌های زه‌کش بر توزیع فشار آب حفره‌ای

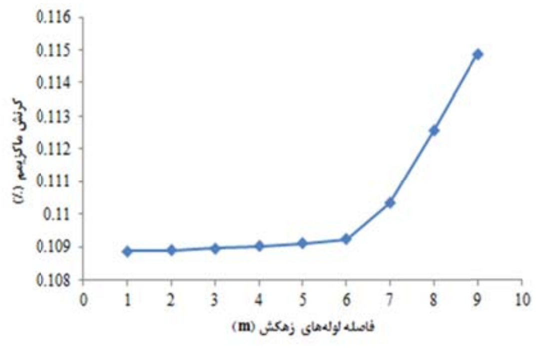


شکل ۳۱ تأثیر طول لوله‌های زه‌کش بر گرادیان هیدرولیکی

در شکل (٣١) مقدار گرادیان هیدرولیکی به‌ازای طول‌های لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (٣١) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که با افزایش طول لوله‌های زه‌کش، گرادیان هیدرولیکی کاهش می‌یابد. هم‌چنین این کاهش گرادیان هیدرولیکی تا همان طول ٤ متر برای لوله‌های زه‌کش مشهود است. این امر نیز دلالت بر حاکمیت عوامل هیدرولیکی نسبت به عوامل مکانیکی بر تونل تحت تراوش دارد.

اثر فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش

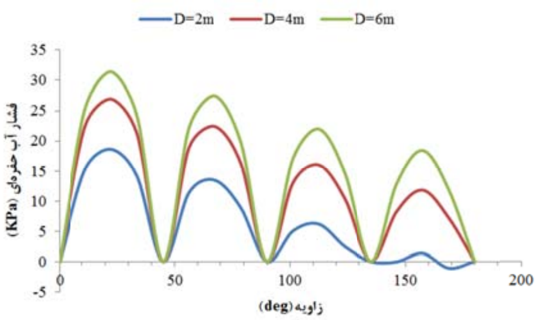
از آن‌جا که در این بخش از بین چهار پارامتر مؤثر بر لوله‌های زه‌کش، فقط به بررسی اثر فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش پرداخته شده است، لذا نیاز به درنظر گرفتن سه مقدار ثابت، برای سه پارامتر مؤثر دیگر بر لوله‌های زه‌کش است. در بخش قبل به این نتیجه رسیده شد که بهترین طول برای لوله‌های زه‌کش در آرایش مذکور، طول ٤ متر می‌باشد. لذا در این بخش سه مقدار ثابت ٨، ٤ متر و ٩٠ درجه، به‌ترتیب برای سه پارامتر تعداد، طول و زاویهٔ لوله‌های زه‌کش درنظر گرفته شده است. هم‌چنین برای بررسی اثر فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش بر کرنش ماکزیمم، فاصله‌های ١ تا ٩ متر برای لوله‌های زه‌کش درنظر گرفته شده است. در شکل (٣٢) مقدار کرنش ماکزیمم، به‌ازای این فاصله‌های لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است.



شکل ٣٢ تأثیر فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش بر کرنش ماکزیمم

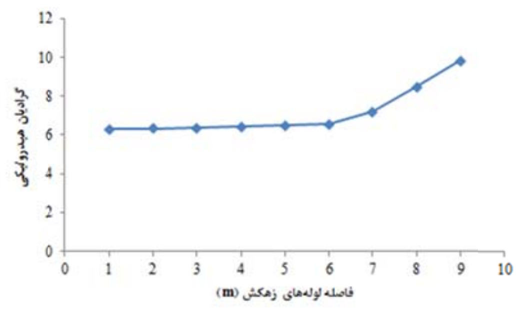
همان‌گونه که در شکل (٣٢) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که با افزایش فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش، کرنش ماکزیمم افزایش می‌یابد. هم‌چنین این افزایش کرنش ماکزیمم تا فاصلهٔ ٦ متر، برای لوله‌های زه‌کش قابل ملاحظه نیست. لذا به‌دلیل ملاحظات اقتصادی، می‌توان بهترین فاصله برای لوله‌های زه‌کش در آرایش مذکور را فاصلهٔ ٦ متر دانست.

برای بررسی اثر فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش بر فشار آب حفره‌ای، فقط فاصله‌های ٢، ٤ و ٦ متر برای لوله‌های زه‌کش درنظر گرفته شده است. در شکل (٣٣) توزیع فشار آب حفره‌ای، به‌ازای این فاصله‌های لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است.



شکل ٣٣ تأثیر فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش بر توزیع فشار آب حفره‌ای

همان‌گونه که در شکل (٣٣) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که با افزایش فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. در شکل (٣٤) مقدار گرادیان هیدرولیکی، به‌ازای فاصله‌های لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است.



شکل ٣٤ تأثیر فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش بر گرادیان هیدرولیکی

همان‌گونه که در شکل (٣٤) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که با افزایش فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش، گرادیان هیدرولیکی افزایش می‌یابد. هم‌چنین این افزایش گرادیان هیدرولیکی تا همان فاصلهٔ ٦ متر برای لوله‌های زه‌کش قابل ملاحظه نیست. این امر نیز دلالت بر حاکمیت عوامل هیدرولیکی نسبت به عوامل مکانیکی بر تونل تحت تراوش دارد.

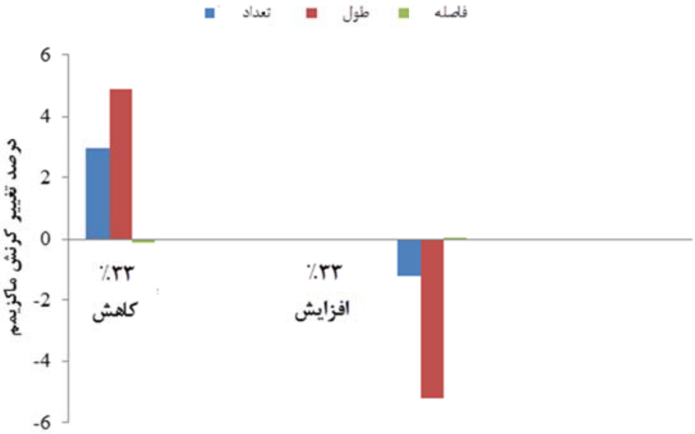
آرایش بهینهٔ سیستم زه‌کش چتری

از آن‌جا که هدف اصلی این بخش ارائهٔ یک آرایش بهینه برای لوله‌های زه‌کش سیستم زه‌کش چتری می‌باشد، لذا لازم است در ابتدا به نوعی تشخیص داده شود که از عوامل مؤثر بر لوله‌های زه‌کش کدام یک از اولویت بالاتری در طراحی لوله‌های زه‌کش سیستم زه‌کش چتری برخوردار است. لذا در این قسمت اقدام به حساسیت‌سنجی در مدل‌سازی شده است. لازم به ذکر است که مطالب ارائه شده در این قسمت، به هیچ عنوان به‌منزلهٔ یک تحلیل آماری بر مدل‌سازی برای عوامل مؤثر بر لوله‌های زه‌کش نمی‌باشد. فقط به‌منزلهٔ روشی برای دست‌یابی به اولویت‌های طراحی از بین عوامل مؤثر بر لوله‌های زه‌کش می‌باشد، که در یافتن ساده‌تر یک آرایش بهینه برای لوله‌های زه‌کش سیستم زه‌کش چتری کمک کرده است.

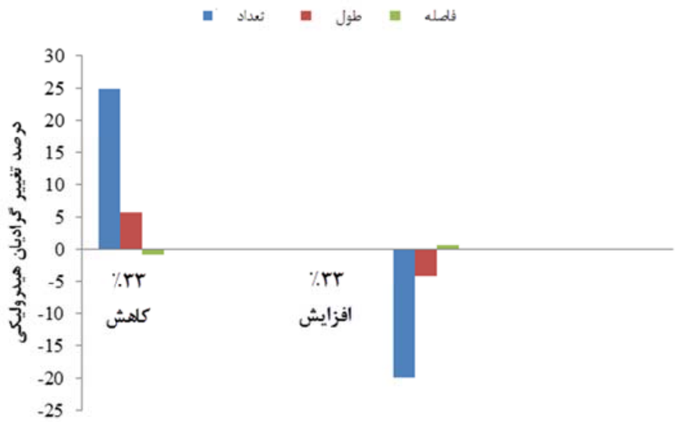
برای تحلیل حساسیت در مدل‌سازی، در ابتدا نیاز به یک مدل مبنا برای سیستم زه‌کش چتری است. آرایش لوله‌های زه‌کش در مدل مبنا برای سیستم زه‌کش چتری، از تحلیل‌های صورت گرفته در بخش‌های قبل بر روی تک‌تک عوامل مؤثر بر لوله‌های زه‌کش گرفته شده است. در بخش‌های قبل براساس کرنش ماکزیمم به این نتایج رسیده شد که بهترین تعداد برای لوله‌های زه‌کش در مقطع دایروی تونل ٨ عدد است. زاویهٔ بهینه برای لوله‌های زه‌کش زاویهٔ ٩٠ درجه نسبت به محور طولی تونل است. بهترین طول برای لوله‌های زه‌کش ٤ متر است. هم‌چنین بهترین فاصله برای لوله‌های زه‌کش ٦ متر است. البته لازم به ذکر است که این مقادیر بهینه برای عوامل مؤثر بر لوله‌های زه‌کش، با فرض ثابت بودن سه مقدار ثابت برای سایر عوامل مؤثر بر لوله‌های زه‌کش به‌دست آمده است. هم‌چنین از آن‌جا که با درنظر گرفتن عبارت N.L/D، پارامترهای تعداد، طول و فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش از عوامل اصلی توجیه‌پذیر کردن آرایش بهینه از لحاظ اقتصادی هستند، لذا برای دست‌یابی به مدل مبنا برای سیستم زه‌کش چتری، از مقادیر میانهٔ بهینهٔ این عوامل مؤثر بر لوله‌های زه‌کش استفاده شده است. بنابراین، مدل مبنا برای سیستم زه‌کش چتری به‌صورت N6L2D3A90 درنظر گرفته شده است. سپس برای تحلیل حساسیت در مدل‌سازی، اقدام به ٣٣ درصد کاهش و افزایش برروی تک‌تک عوامل مؤثر بر لوله‌های زه‌کش گردیده است.

از آن‌جا که رویکرد اصلی در این تحقیق، ارائهٔ آرایش بهینه برای لوله‌های زه‌کش سیستم زه‌کشی چتری براساس کرنش ماکزیمم است. لذا در شکل (٣٥) درصد تغییرات کرنش ماکزیمم، به‌ازای ٣٣ درصد کاهش و افزایش در عوامل مؤثر بر لوله‌های زه‌کش مدل مبنا برای سیستم زه‌کش چتری نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (٣٥) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که تغییرات در طول، تعداد و فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش به‌ترتیب بیش‌ترین تأثیر را بر کرنش ماکزیمم گذاشته است.

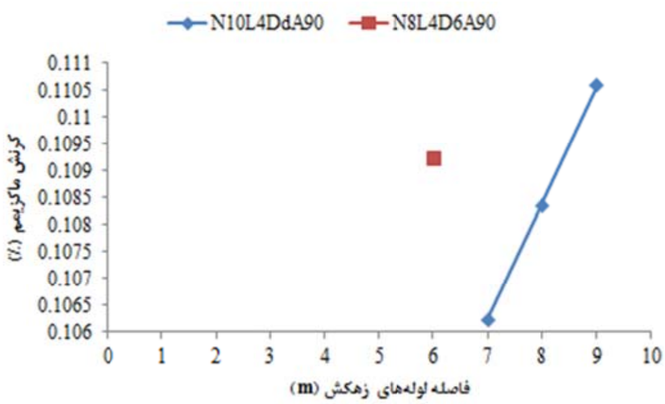
در شکل (٣٦) درصد تغییرات گرادیان هیدرولیکی، به‌ازای ٣٣ درصد کاهش و افزایش در عوامل مؤثر بر لوله‌های زه‌کش مدل مبنا برای سیستم زه‌کش چتری نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (٣٦) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که تغییرات در تعداد، طول و فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش به‌ترتیب بیشترین تأثیر را بر گرادیان هیدرولیکی گذاشته است.



شکل ۳۵ درصد تغییرات کرنش ماکزیمم در تحلیل حساسیت در مدل‌سازی



شکل ٣٦ درصد تغییرات گرادیان هیدرولیکی در تحلیل حساسیت در مدل‌سازی



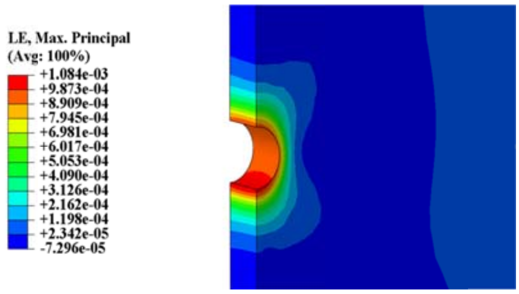
شکل ۳۷ تأثیر فاصلهٔ لوله‌های زهکش بر کرنش ماکزیمم در آرایش بهینهٔ سیستم زهکش چتری

باز یادآوری می‌گردد که مطالب ارائه‌شده در این قسمت فقط در بازهٔ ۳۳ درصد عوامل مؤثر بر لوله‌های زهکش مدل مبنا برای سیستم زه‌کش چتری قابل گزارش هستند. این بازه‌ها شامل، تعداد لوله‌های زه‌کش بین ٤ تا

۸ عدد در مقطع دایروی تونل، طول لوله‌های زه‌کش بین ۱/۵ تا ۲/٦۷ متر و فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش بین ۲/۲۵ تا ٤ متر می‌باشند.

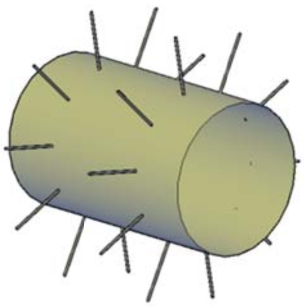
در قسمت تحلیل حساسیت در مدل‌سازی به این نتیجه رسیده شد که تغییرات در طول، تعداد و فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش به‌ترتیب بیشترین تأثیر را برروی کرنش ماکزیمم داشتند. لذا طول، تعداد و فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش به‌ترتیب به‌عنوان اولویت‌های طراحی عوامل مؤثر بر لوله‌های زه‌کش سیستم زه‌کش چتری درنظر گرفته شده است. لذا با درنظر گرفتن همان طول ٤ متر برای لوله‌های زه‌کش و تعداد ۱۰ عدد لوله زه‌کش در مقطع دایروی تونل، اقدام به افزایش فاصله بین لوله‌های زه‌کش بین ۷ متر تا ۹ متر شده است. در شکل (۳۷) مقدار کرنش ماکزیمم، به‌ازای این فاصله‌های لوله‌های زه‌کش نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۳۷) نشان داده شده است نتیجه می‌شود که تا فاصلهٔ ۸ متر برای لوله‌های زه‌کش آرایش مذکور، هم‌چنان کرنش ماکزیمم کمتر از مدل N8L4D6A90 می‌باشد. لذا می‌توان مدل N10L4D8A90 را به‌عنوان آرایش بهینه، برای لوله‌های زه‌کش سیستم زه‌کش چتری دانست. هم‌چنین عبارت N.L/D به‌ترتیب برای مدل‌های N8L4D6A90 و N10L4D8A90، ۵/۳۳ و ۵ می‌باشد، که این امر خود بیانگر اقتصادی‌تر بودن مدل N10L4D8A90 نسبت به مدل N8L4D6A90 می‌باشد. البته لازم به ذکر است که هر گونه تلاشی با درنظر گرفتن تعداد بیشتر یا کمتر از ۸ عدد لولهٔ زه‌کش در مقطع دایروی تونل و با تغییر فاصلهٔ بین آنها منجر به دست‌یابی هیچ مدل بهینه‌تری که از لحاظ اقتصادی هم مقرون به صرفه‌تر باشد نگردید.

در شکل (۳۸) کانتور کرنش ماکزیمم در آرایش بهینهٔ سیستم زه‌کش چتری نشان داده شده است. هم‌چنین در شکل (۳۹) آرایش بهینهٔ سیستم زه‌کش چتری نشان داده شده است.

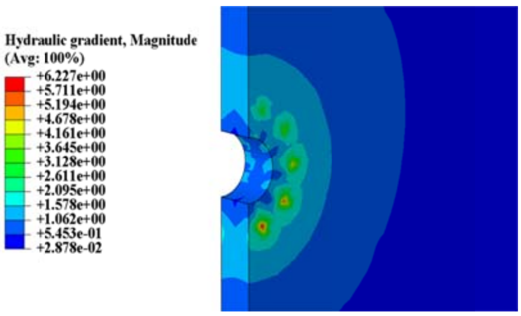


شکل ۳۸ کانتور کرنش ماکزیمم در آرایش بهینهٔ سیستم زه‌کش چتری

مقدار گرادیان هیدرولیکی در آرایش بهینهٔ سیستم زه‌کش چتری، درمقایسه با مدل N8L4D6A90 کمتر است، که باز دلالت بر انتخاب درست این آرایش به‌عنوان آرایش بهینه برای لوله‌های زه‌کش سیستم زه‌کش چتری دارد. در شکل (٤۰) کانتور گرادیان هیدرولیکی در آرایش بهینهٔ سیستم زه‌کش چتری نشان داده شده است.



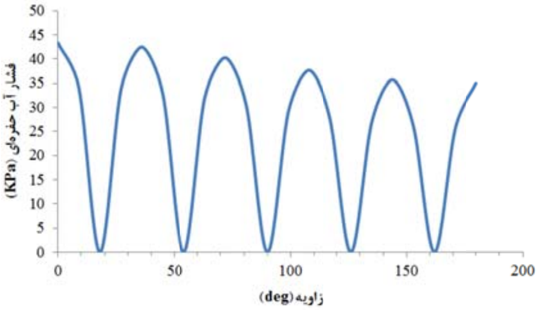
شکل ۳۹ آرایش بهینهٔ سیستم زه‌کش چتری



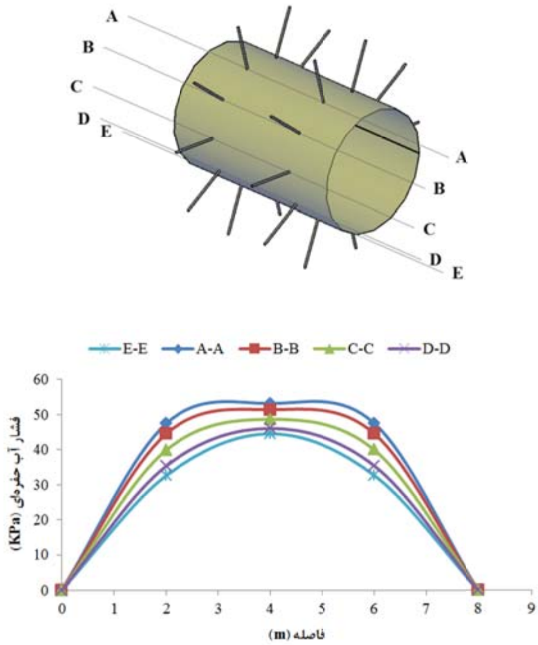
شکل ٤۰ کانتور گرادیان هیدرولیکی در آرایش بهینهٔ سیستم زه‌کش چتری

باید توجه داشت که آرایش بهینهٔ ارائه‌شـده بـرای سیستم زه‌کش چتری، منحصر به این تونل با مشخصات هندسی و فیزیکی مصالح گفته‌شده می‌باشد. درنتیجـه از این آرایش بهینه برای سیستم زه‌کش چتـری، مـی‌تـوان برای تونل‌هایی با مشخصات هندسی و فیزیکی مصـالح نسبتاً مشابه استفاده کرد.

در شـکل (٤١) توزیـع فشـار آب حفـره‌ای بـرای آرایش بهینـهٔ سیسـتم زه‌کـش چتـری نشـان داده شـده است.



شکل ٤١ توزیع فشار آب حفره‌ای برای آرایش بهینهٔ سیستم زه‌کش چتری



شکل ٤٢ توزیع فشار آب حفره‌ای در فاصلهٔ بین لوله‌های زه‌کش آرایش بهینهٔ سیستم زه‌کش چتری

در شکل (٤٢) توزیع فشار آب حفره‌ای، در فاصلهٔ بین لوله‌های زه‌کش برای آرایش بهینـهٔ سیسـتم زه‌کـش چتری نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق بـرای اولـین بـار بـا درنظـر گـرفتن سـه خروجی شاهد کرنش مؤثر ماکزیمم، فشار آب حفره‌ای و گرادیان هیدرولیکی به بررسی کلیهٔ پارامترهـای مـؤثر بر لولهٔ زه‌کش سیستم زه‌کش چتری پرداخته شد و یـک آرایش بهینه برای آنهـا ارائـه گردیـد. حـال باتوجـه بـه مطالب ارائه‌شده در این تحقیق نتایج زیر را می‌توان بیان کرد:

١. از هر آرایش تعدادی لولـه‌هـای زه‌کـش، فقـط یـک حالـت وجـود دارد کـه بـه‌صـورت بهینـه کـرنش ماکزیمم کمتری را ایجاد می‌کنـد، کـه ایـن حالـت، الزاماً همان حالت بهینه بـه‌منظـور کـاهش گرادیـان هیدرولیکی نمی‌باشد.
٢. در آرایش تعدادی لوله‌های زه‌کش در سیستم زه‌کش چتری، ضرورت کاربرد سیستم زه‌کشی معکوس در تونل‌های تحت تراوش به اثبات رسید.
٣. در سیستم زه‌کش چتری با درنظر گرفتن تعـداد زوج بـرای لولـه‌هـای زه‌کـش در مقطـع دایـروی تونـل، می‌توان از کاهش مؤثرتر گرادیان هیـدرولیکی بهـره برد.
٤. رفتار کرنش ماکزیمم و گرادیان هیدرولیکی تونل، بـا تغییر عوامل مؤثر در لوله‌های زه‌کش سیستم زه‌کش چتری هر دو مشابه یکدیگر است. این امـر بیـانگر، حاکمیـت عوامـل هیـدرولیکی نسـبت بـه عوامـل مکانیکی بر تونل‌های تحت تراوش است.
٥. در سیستم زه‌کش چتری، افـزایش تعـداد لولـه‌هـای زه‌کـش در مقطـع دایـروی تونـل، افـزایش زاویـهٔ لوله‌های زه‌کش نسبت به محور طولی تونل، افزایش

طول لوله‌های زه‌کش و کاهش فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش باعث کاهش کرنش ماکزیمم، فشار آب حفره‌ای و گرادیان هیدرولیکی می‌گردد.

٦. در طراحی لوله‌های زه‌کش سیستم زه‌کش چتری، طول، تعداد و فاصلهٔ لوله‌های زه‌کش به‌ترتیب بیشترین اهمیت را دارند.

٧. آرایش بهینه برای لوله‌های زه‌کش سیستم زه‌کش چتری به صورت، تعداد ١٠ عدد لولهٔ زه‌کش در مقطع دایروی تونل، به طول ٤ متر، فاصلهٔ ٨ متر و زاویهٔ ٩٠ درجه نسبت به محور طولی تونل می‌باشد. البته لازم به ذکر است که این آرایش بهینه برای سیستم زه‌کش چتری، برای تونل‌هایی با مشخصات هندسی و فیزیکی مصالح نسبتاً مشابه ذکرشده ارائه گردیده است.

مراجع

1. H-S.Shin., D-J.Youn., S-E.Chae., and J-H.Shin., "Effective Control of Pore Water Pressures on Tunnel Linings Using Pin-Hole Drain Method", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, pp. 555-561, (2009).
2. H-S.Jung., Y-S.Han., S-R.Chung., B-S.Chun., and Y-J.Lee., "Evaluation of Advanced Drainage Treatment for Old Tunnel Drainage System in Korea", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 38, pp. 476-486, (2013).
3. S-W.Nam., and A.Bobet., "Liner Stresses in Deep Tunnels Below the Water Table", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, pp. 626-635, (2006).
4. A.Fahimifar., and M.Zareifard., "A Theoretical Solution for Analysis of Tunnels Below Groundwater Considering the Hydraulic-Mechanical Coupling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, pp. 634-646, (2009).
5. S-W.Lee., J-W.Jung., S-W.Nam., and I-M.Lee., "The Influence of Seepage Forces on Ground Reaction Curve of Circular Opening", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 22, pp. 28-38, (2006).
6. Y-J.Shin., B-M.Kim., J-H.Shin., and I-M.Lee., "The Ground Reaction Curve of Underwater Tunnels Considering Seepage Forces", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 25, pp. 315-324, (2010).
7. I-M.Lee., and S-W.Nam., "Effect of Tunnel Advance Rate on Seepage Forces Acting on the Underwater Tunnel Face", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 19, pp. 273-281, (2004).
8. S-C.Li., and M-B.Wang., "Elastic Analysis of Stress-Displacement Field for a Lined Circular Tunnel at Great Depth Due to Ground Loads and Internal Pressure", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 609-617, (2008).

9. C.Callari., "Coupled Numerical Analysis of Strain Localization Induced by Shallow Tunnels in Saturated Soils", *Computers and Geotechnics*, Vol. 31, pp. 193-207, (2004).
10. J-H.Shin., S-H.Kim., and Y-S.Shin., "Long-Term Mechanical and Hydraulic Interaction and Leakage Evaluation of Segmented Tunnels", *Soils and Foundations*, Vol. 52, pp. 38-48, (2012).
11. P. Arjnoi., J-H. Jeong., C-Y.Kim., and K-H.Park., "Effect of Drainage Conditions on Porewater Pressure Distributions and Lining Stresses in Drained Tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 24, pp. 376-389, (2009).
12. W. Xiuyinga., T. Zhongsheng., W. Mengshu., Z. Mi., and H. Ming., "Theoretical and Experimental Study of External Water Pressure on Tunnel Lining in Controlled Drainage Under High Water Level", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 552-560, (2008).
13. A. Bobet., "Effect of Pore Water Pressure on Tunnel Support During Static and Seismic Loading", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 18, pp. 377-393, (2003).
14. Y-J. Shin., K-I. Song., I-M. Lee., and G-C. Cho., "Interaction Between Tunnel Supports and Ground Convergence-Consideration of Seepage Forces", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 48, pp. 394-405, (2011).
15. I-M. Lee., J-S. Lee., and S-W. Nam., "Effect of Seepage Force on Tunnel Face Stability Reinforced with Multi-Step Pipe Grouting", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 19, pp. 551-565, (2004).
16. I-M. Lee., and S-W. Nam., "The Study of Seepage Forces Acting on the Tunnel Lining and Tunnel Face in Shallow Tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 16, pp. 31-40, (2001).
17. D. Kolymbas., and P. Wagner., "Groundwater Ingress to Tunnels - The Exact Analytical Solution", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 22, pp. 23-27, (2007).
18. C. Butscher., "Steady-State Groundwater Inflow into a Circular Tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 32, pp. 158-167, (2012).
19. K-H. Park., A. Owatsiriwong., and J-G. Lee., "Analytical Solution for Steady-State Groundwater Inflow into a Drained Circular Tunnel in a Semi-Infinite aQuifer: A Revisit", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 206-209, (2008).
20. G. Fernandez., and J. Moon., "Excavation-Induced Hydraulic Conductivity Reduction Around a Tunnel - Part 1: Guideline for Estimate of Ground Water Inflow Rate", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 25, pp. 560-566, (2010).

۲۱. حسین‌بالام، علی، "تحلیل عددی استاتیکی عملکرد زه‌کش چتری در تونل دایروی عمیق تحت تراوش پایدار"، پایان‌نامهٔ کارشناسی

ارشد مهندسی عمران (خاک و پی)، گروه عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، (۱۳۹۳).

22. Simulia, ABAQUS 6-13-1 reference manual, (2014).